

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-152531

(43) 公開日 平成8年(1996)6月11日

(51) Int.Cl.⁸

G 0 2 B 6/00

6/22

H 0 1 S 3/07

3/10

3/17

識別記号

3 7 6 B

庁内整理番号

Z

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号

特願平7-154504

(22) 出願日

平成7年(1995)6月21日

(31) 優先権主張番号

特願平6-231348

(32) 優先日

平6(1994)9月27日

(33) 優先権主張国

日本 (J P)

(71) 出願人

000004226

日本電信電話株式会社

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72) 発明者

阪本 匡

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者

金森 照寿

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者

山田 誠

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人

弁理士 谷 義一 (外1名)

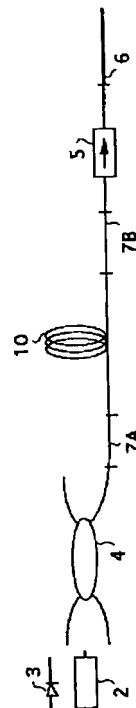
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 増幅用光ファイバ

(57) 【要約】

【目的】 1. $65\mu\text{m}$ 帯の高効率光増幅を実現するための光ファイバ増幅器用の Tm を添加した増幅用光ファイバを提供すること。

【構成】 本発明による増幅用光ファイバは、コア内に活性イオン Tm を有し、クラッドに Ho, Eu, Tb, Nd, Dy, Sm のうち少なくとも1種類のイオンを含むか、または、コア内に活性イオン Tm と Ho, Eu, Tb, Nd, Dy, Sm のうち少なくとも1種類のイオンを有する。光ファイバ増幅器はこの増幅用光ファイバ 10 と信号入力用光ファイバ 2 と、励起光源 3 と、励起光源からの励起光と信号光である $1.65\mu\text{m}$ の光を合波できる WDM ファイバカップラ 4 と、光アイソレータ 5 と信号光出力用光ファイバ 6 と、フッ化物ガラスファイバと、石英ファイバの接続をよくするための高 Δn 石英ファイバ 7A, 7B とからなる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 コア内に活性イオン T_m を含有し、クラッドに T_b , Eu , Ho , Dy , Sm , Nd のうち少なくとも1種類のイオンを含有することを特徴とする増幅用光ファイバ。

【請求項2】 コア内に活性イオン T_m と T_b , Eu , Ho , Dy , Sm , Nd のうち少なくとも1種類のイオンを含有することを特徴とする増幅用光ファイバ。

【請求項3】 2層以上のコアを有し、そのうち1層以上に活性イオン T_m を、 T_m を含まない1層以上に T_b , Eu , Ho , Dy , Sm , Nd のうち少なくとも1種類のイオンを含有することを特徴とする増幅用光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、光通信に用いられる光ファイバ増幅器のための増幅用光ファイバに関するものである。

【0002】

【従来の技術】 現在光ファイバ増幅器は、光通信システムのキーデバイスと考えられ、開発が進められている。特に光通信における信号光波長である $1.3\mu m$ 帯においては Pr を活性イオンとして、 $1.5\mu m$ 帯においては Er を活性イオンとした研究が行われている。

【0003】 光通信線路である光ファイバの破断や故障を監視する光通信システム用のプローブ光として、 $1.65\mu m$ 帯の光を用いた場合のシステムの検討が現在なされていて（例えばY. Koyamada et al, "Basic Concepts for Fiber Optic Subscriber Loop Operation Systems", Proceedings of ICC 341, 1, pp. 1541-1544 (1990) 参照）、そのシステムに用いられる $1.65\mu m$ 帯光ファイバ増幅器が囑望されている。 $1.6\mu m$ 帯光ファイバ増幅器の活性イオンとしては T_m を用いる場合が検討されている（例えば、三井泉他、「 T_m 添加光ファイバの諸特性」電子情報通信学会技術研究報告 OQE90-85 pp. 89~94 参照）。図1に T_m のエネルギー準位図を示す。この場合、 ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ の3準位系の誘導放出を利用する。励起は、 $690nm$ 、 $800nm$ 帯、 $1200nm$ 、 $1550 \sim 1625nm$ 付近の励起光を用いることが可能である。図2には一般的な光ファイバ増幅器の構成を示す。図2に示すように、光ファイバ増幅器は増幅用光ファイバ1と、信号入力用光ファイバ2と、励起光源3と、信号光2Aと励起光源からの励起光3Aを合波器4により合波し、コア内に T_m を添加した光ファイバ1へ導入する。必要に応じて、光アイソレータ5を用いる場合もある。増幅された信号光は信号出力用光ファイバ6から出力する。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】 活性イオン T_m の誘導放出遷移（ ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ ）から発せられる吸収スペクトルおよび自然放出スペクトル（蛍光スペクトル）を図3に示す。図中、8は吸収断面積を表わす曲線、9は蛍光断面積を表わす曲線である。この遷移を用いる場合、図3に示すように自然放出スペクトルの中心波長は $1.8\mu m$ 付近である。また、吸収スペクトルは中心波長が $1.65\mu m$ である。これらより明らかなように、 $1.8 \sim 2.0\mu m$ 帯において、増幅された自然放出光（Amplified Spontaneous Emission: ASE）に励起エネルギーの多くが使われていることになる。このため、目的波長である $1.65\mu m$ の増幅に寄与する励起エネルギーが少なくなってしまう。また、 $1.8 \sim 2.0\mu m$ 帯における単一行路の利得が高いために、レーザ発振を起こし易い。レーザ発振が起きると、それ以上励起光を投入しても $1.65\mu m$ 帯において利得を高くできない。

【0005】 本発明の目的は、 $1.65\mu m$ 帯の高効率光増幅を実現するための光ファイバ増幅器用の T_m を添加した増幅用光ファイバを提供することにある。

【0006】

【課題を解決するための手段】 上記の目的を達成するために、本発明の第1の解決手段に従う増幅用光ファイバは、コア内に活性イオン T_m を含有し、クラッドに T_b , Eu , Ho , Dy , Sm , Nd のうち少なくとも1種類のイオンを含有することを特徴とする。

【0007】 本発明の第2の解決手段に従う増幅用光ファイバは、コア内に活性イオン T_m と T_b , Eu , Ho , Dy , Sm , Nd のうち少なくとも1種類のイオンを含有することを特徴とする。

【0008】 本発明の第3の解決手段に従う増幅用光ファイバは、2層以上のコアを有し、そのうち1層以上に活性イオン T_m を、 T_m を含まない1層以上に T_b , Eu , Ho , Dy , Sm , Nd のうち少なくとも1種類のイオンを含有することを特徴とする。

【0009】

【作用】 図4～図9はそれぞれ T_b , Eu , Ho , Nd , Dy , Sm イオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。図4～図9において、 T_b , Eu , Ho , Nd , Dy , Sm はそれぞれ $1.8\mu m$ 帯近傍に吸収を持つ。光ファイバのコアまたはクラッドに吸収剤イオンである Ho , Eu , T_b , Nd , Dy , Sm のうち少なくとも1種類のイオンを添加することにより、 $1.8\mu m$ 帯から $2.0\mu m$ の光はそれぞれのイオンにより吸収される。このため、次の2つの効果が得られる。(1) $1.8\mu m \sim 2.0\mu m$ 帯においてASE強度が大きくなるのを抑えることができ、励起光エネルギーがこのASEの成長に使われるのを抑えることができる。この結果 $1.65\mu m$ 帯における高効率増幅が達成できる。

(2) 1.8 μm 帯～2.0 μm 帯におけるレーザ発振を抑えることができ、レーザ発振により1.65 μm 帯における利得が、励起光強度を強くしてもそれ以上に上がらなくなるという現象を防ぐことができる。

【0010】吸収剤イオンをクラッドに添加した場合、コアに添加した場合と、2層以上のコア構造を用いて吸収剤と活性イオンTmを分離して添加した場合では、それぞれ以下のような長所および短所を有することになる。

【0011】クラッドに吸収剤イオンであるHo, Eu, Tb, Nd, Dy, Smの少なくとも1種類のイオンを添加した場合、クラッドにしみ出している光(エバネセントフィールド)を吸収することになる。このため、Tmとそれぞれのイオン間の相互作用はなく、Tmの上準位寿命の減少によるアンプの効率の低下はない。しかしながら、マルチモードファイバ等の、クラッドに光がほとんどしみ出さないファイバにおいてはこの方法は用いることができない。

【0012】コアに吸収剤イオンであるTb, Eu, Ho, Dy, Sm, Ndの少なくとも1種類のイオンを添加した場合、Tmとそれぞれのイオン間の相互作用(クロスリラクセーション)により、Tmの上準位寿命が減少しアンプの効率が落ちることになる。しかしながら、一番光が閉じ込められるコアに吸収剤イオンを添加するため、吸収剤としての効果が大きくなり高効率増幅が期待できる。

【0013】2層以上のコアを有する構造の光ファイバにおいて、そのうち1層以上にTm、別の1層以上に吸収剤イオンであるHo, Eu, Tb, Nd, Dy, Smの少なくとも1種類を添加した場合、Tmと吸収剤イオンがクロスリラクセーションを起こすことなく添加できるため、アンプの効率が落ちることはない。また、光が閉じ込められるコアに添加しているため吸収剤としての効果を十分期待できる。特に中心層にTmを添加したシングルモード伝搬の場合は、励起光の強度が一番強い領域でTmとカップリングするため高効率増幅が期待できる。またマルチモードファイバ等のクラッドに光がほとんどしみ出さないような光ファイバにおいてもこの方法を用いることができるという利点も持つ。しかしながらこの構造のファイバを作製する際に、作製過程が複雑でかつファイバの損失が生じ易いという欠点を持つ。

【0014】

【実施例】以下、図面を参照して本発明の実施例を詳細に説明する。本発明はこれらの実施例に限定されることは勿論である。

【0015】<実施例1>実施例1においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにTbを2000ppm添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。Tbの吸収は1.6 μm ～2.0 μm にわたっており、かつ、1.8 μm 帯において非常に大きいため、1.65 μm

で多少光損失は増えるものの、ASEおよびレーザ発振を抑えるのに有効である。コアにTmを、クラッドにTbを分離して添加した場合、TmとTbとの相互作用(クロスリラクセーション)はなく、高効率増幅が可能となる。

【0016】フッ化物ガラスファイバは、ガラス組成が $\text{ZrF}_4 - \text{BaF}_2 - \text{LaF}_3 - \text{YF}_3 - \text{AlF}_3 - \text{LiF} - \text{NaF}$ 系の単一モードファイバ(ZBLA LNファイバ)を用いる。それぞれのファイバのモル比は ZrF_4 が56mol%、 BaF_2 が14mol%、 LaF_3 が3.5mol%、 YF_3 が2mol%、 AlF_3 が7mol%、 LiF が2.5mol%、 PbF_2 が15mol%であり、このガラスのナトリウムD線を用いた屈折率は1.5532である。クラッドガラスは ZrF_4 が47.5mol%、 BaF_2 が23.5mol%、 LaF_3 が2.5mol%、 YF_3 が2mol%、 AlF_3 が4.5mol%、 NaF が20mol%であり、このガラスのナトリウムD線を用いた屈折率は1.49552であった。このファイバは比屈折率差が3.7%である。ファイバ長を一番利得が得られる8m、コア径を2.0 μm とした。

【0017】この場合、1.65 μm 帯の光はコアに約5割閉じ込められ、約5割がクラッドにしみ出すことになる。また1.8 μm 帯の光は約4割がコアに閉じ込められ、約6割クラッドにしみ出すことになる。

【0018】図10に、フッ化物ガラスファイバを用いた光ファイバ増幅器の構成を示す。光ファイバ増幅器は上述のフッ化物ガラスファイバからなる光ファイバ10と信号入力用光ファイバ2と、励起光源3と、励起光源からの励起光と信号光である1.65 μm の光を合波できるWDM〔波長分割多重(wavelength division multiplexing)〕ファイバカップラ4と、光アイソレータ5と信号光出力用光ファイバ6と、フッ化物ガラスファイバと、石英ファイバの接続をよくするための高 Δn の石英ファイバ7A、7Bとからなる。励起光源はこの場合、0.8 μm 帯高出力レーザ(半導体LDモジュール)、1.2 μm 帯高出力レーザ(半導体LDモジュール)、1.58 μm 帯Erファイバレーザの3種類が使用可能である。

【0019】信号光入力用光ファイバ2と半導体LDモジュール(励起光源)3とをWDMファイバカップラ4に接続し、信号光と励起光を合波する。合波した光を取り出すWDMファイバカップラ4のポートには、接合部での光損失を減らすためのマイクロバーナを用いてコア径を広げた高 Δn 石英ファイバ7Aの一端を接続する。高 Δn 石英ファイバ7Aの他端にはガラス製V溝ブロックを取り付け、同じくV溝ブロックを取り付けたフッ化物ガラスファイバ10の一端と高精度に調芯した後、UV接着剤で接続する。フッ化物ガラスファイバ10の他端にも同様の方法で高 Δn 石英ファイバ7Bの一端を接

続する。高 Δn 石英ファイバ7Bの他端も先述したようにマイクロパーナでコア径を広げて光アイソレータ5の一端に接続する。光アイソレータ5の他端には信号出力用光ファイバ6を取り付ける。

【0020】図11には、励起光源が0.8 μ m帯LD、1.2 μ m帯LD、1.58 μ m帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性を示す。励起光源が0.8 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得6dBを得た。利得計数は0.1dB/mWであった。励起光源が1.2 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得30dBを得た。利得係数は0.5dB/mWであった。励起光源が1.58 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得36dBを得た。利得係数は0.6dB/mWであった。

【0021】<実施例2>実施例2においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにEuを10000ppm添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。Euは1.8 μ mから2.0 μ mに吸収を持つが、特にASEの成長し易い1.8 μ m帯では吸収が小さい。そのため高効率増幅のためには、クラッドに多量のEuを添加する必要がある。Euは1.65 μ m帯に吸収を持たないために、低雑音の増幅器が作製可能である。

【0022】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0023】励起光源が0.8 μ m帯LD、1.2 μ m帯LD、1.58 μ m帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例1の場合と同じ傾向を示し、励起光波長0.8 μ m、励起光強度が100mWの場合に信号利得5dBを得た。利得係数は0.08dB/mWであった。励起光波長1.2 μ m、励起光強度が100mWの場合に信号利得28dBを得た。利得係数は0.5dB/mWであった。励起光源が1.58 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得30dBを得た。利得係数は0.5dB/mWであった。

【0024】<実施例3>実施例3においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにHoを5000ppm添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。Hoは1.8 μ mから2.0 μ mに吸収を持ち、1.65 μ mにほとんど吸収を持たない。このため低雑音な増幅器の作製が可能となる。しかしながらHoが1.2 μ m帯において吸収を持つため、1.2 μ m帯の光を励起光源として用いるときは、高利得を期待できない。

【0025】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0026】励起光源が0.8 μ m帯LD、1.2 μ m帯LD、1.58 μ mファイバレーザとした場合の、こ

の増幅器の小信号利得特性は実施例1と同じ傾向を示し、励起光波長が0.8 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得5dBを得た。利得係数は0.08dB/mWであった。励起光源が1.2 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得を得ることはできなかった。励起光源が1.58 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得30dBを得た。利得係数は0.7dB/mWであった。

【0027】<実施例4>実施例4においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにDyを3000ppm添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。Dyは1.55 μ mから1.85 μ mに吸収を持つため、その領域におけるASEの成長を抑制し、レーザ発振を阻止するという点で有利である。しかしながら、1.85 μ mより長波長での吸収は小さいため、1.85 μ mのより長波長でのASEの成長、レーザ発振を許すことになるという欠点を持ち、かつ1.65 μ m帯で吸収を持つため、信号光の損失が大きくなるという欠点を持つ。

【0028】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0029】励起光源が0.8 μ m帯LD、1.2 μ m帯LD、1.58 μ m帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例1の場合と同様の傾向を示し、励起光源が0.8 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得3dBを得た。利得計数は0.05dB/mWであった。励起光源が1.2 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得12dBを得た。利得係数は0.2dB/mWであった。励起光源が1.58 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得16dBを得た。利得係数は0.25dB/mWであった。

【0030】<実施例5>実施例5においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにSmを3000ppm添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。Smは1.55 μ mから1.65 μ m、1.7 μ m~2.0 μ mに吸収を持つため、その領域におけるASEの成長を抑制し、レーザ発振を阻止するという点で有利である。しかしながら、1.65 μ m帯で多少吸収を持つため、信号光の損失が大きくなるという欠点を持つ。

【0031】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0032】励起光源が0.8 μ m帯LD、1.2 μ m帯LD、1.58 μ m帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例1の場合と同様の傾向を示し、励起光源が0.8 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得2dBを得た。利得係数は0.05dB/mWであった。励起光源が1.2 μ mの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得10

dBを得た。利得係数は0.15 dB/mWであった。励起光源が1.58 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合に信号利得16 dBを得た。利得係数は0.25 dB/mWであった。

【0033】<実施例6>実施例6においては、コアにTmを2000 ppm、クラッドにNdを3000 ppm添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。Ndは1.6 μmから1.85 μmに吸収を持つため、その領域におけるASEの成長を抑制し、レーザ発振を阻止するという点で有利である。しかしながら、1.85 μmより長波長での吸収は小さいため、1.85 μmのより長波長でのASEの成長、レーザ発振を許すことになるという欠点を持ち、かつ1.65 μm帯で吸収を持つため、信号光の損失が大きくなるという欠点を持つ。

【0034】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0035】励起光源が0.8 μm帯LD、1.2 μm帯LD、1.58 μm帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例1と同様の傾向を示し、励起光源が0.8 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合に信号利得2 dBを得た。利得係数は0.04 dB/mWであった。励起光源が1.2 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合に信号利得10 dBを得た。利得係数は0.15 dB/mWであった。励起光源が1.58 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合に信号利得12 dBを得た。利得係数は0.2 dB/mWであった。

【0036】<比較例1>本比較例1においては、Tmをコアに2000 ppm添加した場合について示す。光ファイバの組成、光ファイバの比屈折率差Δn、コア径および増幅器の構成は実施例1のものと同様とする。それぞれの励起光源の場合の利得が高くなるファイバの最適長は実施例1の場合に比べて短くなる。本実施例においてはファイバ長2 mを用いた。

【0037】図12に小信号利得特性を示す。励起光源を0.8 μm帯LD、1.2 μm帯LD、1.58 μm帯ファイバレーザとした。励起光源が0.8 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合には利得は得られなかった。励起光源が1.2 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合に信号利得3 dBを得た。利得係数は0.05 dB/mWであった。励起光源が1.58 μmの場合の励起光強度が100 mWの場合に信号利得4 dBを得た。利得係数は0.06 dB/mWであった。

【0038】1.2 μm帯および1.58 μm帯の励起波長において、100 mW励起の場合に増幅された自然放出光はそれぞれ50 mWおよび75 mW程度であり、励起光のエネルギーの半分以上が増幅された自然放出光に費やされていることが分かる。

【0039】この比較例により、Tb, Eu, Ho, D

y, Sm, Ndのイオンをクラッドに添加することによる効果を明らかにした。

【0040】<実施例7>実施例7においては、コアにTmを1000 ppm、クラッドにTbを1000 ppm添加した場合の石英ファイバを用いた。コアのガラス組成はSiO₂が80 mol%, GeO₂が20 mol%であり、クラッドはSiO₂が100 mol%である。この際、比屈折率差は2.0%であった。コア直径は3.0 μm、ファイバ長は40 mとした。この光ファイバにおいて、1.65 μm帯の光はコア内に5割閉じ込められ、クラッドには5割しみ出すことになる。1.8 μm帯の光はコア内に4割閉じ込められ、クラッドに6割しみ出すことになる。

【0041】図13には、光ファイバ増幅器の構成を示す。光ファイバ増幅器は上述の石英ファイバからなる光ファイバ11と、信号入力用光ファイバ2と、励起光源3として1.58 μmの高出力Er添加ファイバレーザを2個用いる。1.58 μmのEr添加ファイバレーザ3の光と、1.65 μm帯の信号光は、フィルタを用いたファイバカップラ4で合波および分波する。合波用ファイバカップラの信号光入力ポートには、信号光入力用ファイバ2が取り付けられている。石英ファイバ11の両端から、ファイバカップラを介したEr添加ファイバレーザ3の光を導波させる。出力側のファイバカップラ端には光アイソレータ5を介して出力ファイバ6が取り付けられている。

【0042】図14にはこの増幅器の小信号利得特性を示す。200 mWで励起した際に、利得20 dBを得た。利得係数は0.015 dB/mWであった。

【0043】<実施例8>実施例8においては、コアにTmを1000 ppm、クラッドにEuを3000 ppm添加した石英ファイバを用いた。

【0044】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0045】200 mWで励起した際に利得16 dBを得た。利得係数は0.12 dB/mWであった。

【0046】<実施例9>実施例9においては、コアにTmを1000 ppm、クラッドにHoを2000 ppm添加した石英ファイバを用いた。

【0047】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0048】200 mWで励起した際に利得15 dBを得た。利得係数は0.12 dB/mWであった。

【0049】<実施例10>実施例10においては、コアにTmを1000 ppm、クラッドにDyを2000 ppm添加した石英ファイバを用いた。

【0050】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例

7の場合と同じである。

【0051】200mWで励起した際に利得3dBを得た。利得係数は0.025dB/mWであった。

【0052】<実施例11>実施例11においては、コアにTmを1000ppm、クラッドにSmを2000ppm添加した石英ファイバを用いた。

【0053】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0054】200mWで励起した際に利得3dBを得た。利得係数は0.03dB/mWであった。

【0055】<実施例12>実施例12においては、コアにTmを1000ppm、クラッドにNdを2000ppm添加した石英ファイバを用いた。

【0056】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0057】200mWで励起した際に利得2dBを得た。利得係数は0.035dB/mWであった。

【0058】<比較例2>実施例7と同じ構造パラメータを持つ光ファイバにTmを単独で1000ppm添加し、実施例7と同じ構成の光増幅器を作製した。

【0059】光ファイバの長さはASE光が最も強くなる8mを用いたが、利得は得られなかった。

【0060】この結果から、クラッドに吸収剤イオンを添加することの有意性が明らかになった。

【0061】<実施例13>実施例13においては、コアにTmを3000ppm、Tbを3000ppm添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。ガラス組成は、コアガラスにはAl₂O₃が41mol%、GeO₂が6mol%、MgOが5mol%、CaOが48mol%である。また、クラッドガラスにはAl₂O₃が41mol%、SiO₂が6mol%、MgOが5mol%、CaOが48mol%のものを用いた。

【0062】比屈折率差は0.5%程度、コア径は5μm、ファイバ長を6mとした。光ファイバ増幅器の構成は実施例7と同様のものを用いた。

【0063】励起光強度が200mWの際に、利得10dBを得た。利得係数は0.075dB/mWであった。このファイバの損失が2dB/m(1.3μm帯の光で測定した測定値)と大きいことを考えると、このファイバを脱水、原料の精製等により低損失化することにより高効率ファイバ増幅器実現が期待できる。

【0064】<実施例14>実施例14においては、コアにTmを3000ppm、クラッドにEuを3000ppm添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0065】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0066】200mWで励起した際に利得8dBを得た。利得係数は0.06dB/mWであった。

【0067】<実施例15>実施例15においては、コアにTmを3000ppm、クラッドにHoを3000ppm添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0068】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0069】200mWで励起した際に利得7dBを得た。利得係数は0.5dB/mWであった。

【0070】<実施例16>実施例16においては、コアにTmを3000ppm、クラッドにSmを3000ppm添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0071】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0072】200mWで励起した際に利得3dBを得た。利得係数は0.02dB/mWであった。

【0073】<実施例17>実施例17においては、コアにTmを3000ppm、クラッドにDyを3000ppm添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0074】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0075】200mWで励起した際に利得2dBを得た。利得係数は0.015dB/mWであった。

【0076】<実施例18>実施例18においては、コアにTmを3000ppm、クラッドにNdを3000ppm添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0077】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0078】200mWで励起した際に利得1dBを得た。利得係数は0.075dB/mWであった。

【0079】<実施例19>実施例19においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにTbを2000ppm添加したTe系ガラスファイバを用いた。コアガラス作製に用いたガラス組成はTeO₂が70mol%、ZnOが15mol%、PbOが15mol%である。クラッドガラスはTeO₂が70mol%、ZnOが20mol%、CdOが10mol%のもので作製した。この場合光ファイバの比屈折率差は1%であった。

【0080】光ファイバのコア径は4μm、ファイバ長を6mとした。

【0081】200mWで励起した際に利得30dBを得た。利得係数は0.22dB/mWであった。

【0082】＜実施例20＞実施例20においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにHoを2000ppm添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0083】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0084】200mWで励起した際に利得22dBを得た。利得係数は0.16dB/mWであった。

【0085】＜実施例21＞実施例21においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにEuを2000ppm添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0086】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0087】200mWで励起した際に利得26dBを得た。利得係数は0.2dB/mWであった。

【0088】＜実施例22＞実施例22においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにNdを2000ppm添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0089】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0090】200mWで励起した際に利得8dBを得た。利得係数は0.06dB/mWであった。

【0091】＜実施例23＞実施例23においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにSmを2000ppm添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0092】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0093】200mWで励起した際に利得6dBを得た。利得係数は0.05dB/mWであった。

【0094】＜実施例24＞実施例24においては、コアにTmを2000ppm、クラッドにDyを2000ppm添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0095】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0096】200mWで励起した際に利得4dBを得た。利得係数は0.03dB/mWであった。

【0097】＜実施例25＞実施例25においては、コアにTmを2000ppm、Tbを2000ppm共添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。

【0098】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0099】励起光源が0.8μm帯LD、1.2μm帯LD、1.58μm帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は次の通りである。励起光源が0.8μmの場合の励起光強度が100mWの場合

に信号利得4dBを得た。利得係数は0.06dB/mWであった。励起光源が1.2μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得25dBを得た。利得係数は0.375dB/mWであった。励起光源が1.58μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得30dBを得た。利得係数は0.45dB/mWであった。

【0100】＜実施例26＞実施例26においては、コアにTmを2000ppm、Euを2000ppm共添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。

【0101】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0102】励起光源が0.8μm帯LD、1.2μm帯LD、1.58μm帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例25の傾向と同様であった。励起光源が0.8μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得3dBを得た。利得係数は0.05dB/mWであった。励起光源が1.2μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得22dBを得た。利得係数は0.33dB/mWであった。励起光源が1.58μmの場合の励起光源が100mWの場合に信号利得27dBを得た。利得係数は0.40dB/mWであった。

【0103】＜実施例27＞実施例27においては、コアにTmを2000ppm、Hoを2000ppm共添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。

【0104】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0105】励起光源が0.8μm帯LD、1.2μm帯LD、1.58μm帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例25の傾向と同様であった。励起光源が0.8μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得5dBを得た。利得係数は0.075dB/mWであった。励起光源が1.2μmの場合、利得は得られなかった。励起光源が1.58μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得27dBを得た。利得係数は0.4dB/mWであった。

【0106】＜実施例28＞実施例28においては、コアにTmを2000ppm、Dyを2000ppm共添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。

【0107】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0108】励起光源が0.8μm帯LD、1.2μm帯LD、1.58μm帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例25の傾向と同様であった。励起光源が0.8μmの場合の励起光強度が100mWの場合に信号利得は得られなかった。励起光

源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 25dB を得た。利得係数は $0.4\text{dB}/\text{mW}$ であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 28dB を得た。利得係数は $0.42\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0109】＜実施例29＞実施例29においては、コアに Tm を 2000ppm 、 Nd を 2000ppm 共添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。

【0110】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0111】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例25の傾向と同様であった。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 2dB を得た。利得係数は $0.03\text{dB}/\text{mW}$ であった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 9dB を得た。利得係数は $0.12\text{dB}/\text{mW}$ であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 12dB を得た。利得係数は $0.18\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0112】＜実施例30＞実施例30においては、コアに Tm を 2000ppm 、 Sm を 2000ppm 共添加したフッ化物ガラスファイバを用いた。

【0113】光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は実施例1と同様のものを用いた。

【0114】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例25の傾向と同様であった。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合利得は得られなかった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 4dB を得た。利得係数は $0.06\text{dB}/\text{mW}$ であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 6dB を得た。利得係数は $0.09\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0115】＜実施例31＞実施例31においては、コアに Tm を 1000ppm 、 Tb を 2000ppm 共添加した石英ファイバを用いた。

【0116】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0117】 200mW で励起した際に利得 12dB を得た。利得係数は $0.1\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0118】＜実施例32＞実施例32においては、コアに Tm を 1000ppm 、 Eu を 2000ppm 共添加した石英ファイバを用いた。

【0119】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例

7の場合と同じである。

【0120】 200mW で励起した際に利得 8dB を得た。利得係数は $0.06\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0121】＜実施例33＞実施例33においては、コアに Tm を 1000ppm 、 Ho を 2000ppm 共添加した石英ファイバを用いた。

【0122】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0123】 200mW で励起した際に利得 7dB を得た。利得係数は $0.05\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0124】＜実施例34＞実施例34においては、コアに Tm を 1000ppm 、 Nd を 2000ppm 共添加した石英ファイバを用いた。

【0125】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0126】 200mW で励起した際に利得 4dB を得た。利得係数は $0.03\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0127】＜実施例35＞実施例35においては、コアに Tm を 1000ppm 、 Sm を 2000ppm 共添加した石英ファイバを用いた。

【0128】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0129】 200mW で励起した際に利得 1dB を得た。利得係数は $0.007\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0130】＜実施例36＞実施例36においては、コアに Tm を 1000ppm 、 Dy を 2000ppm 共添加した石英ファイバを用いた。

【0131】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。

【0132】 200mW で励起した際に利得 5dB を得た。利得係数は $0.04\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0133】＜実施例37＞実施例37においては、コアに Tm を 3000ppm 、 Tb を 3000ppm 共添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0134】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0135】 200mW で励起した際に利得 17dB を得た。利得係数は $0.25\text{dB}/\text{mW}$ であった。

【0136】＜実施例38＞実施例38においては、コアに Tm を 3000ppm 、 Eu を 3000ppm 共添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0137】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0138】 200mW で励起した際に利得 13dB を

得た。利得係数は0.1 dB/mWであった。

【0139】<実施例39>実施例39においては、コアにTmを3000ppm、Hoを3000ppm共添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0140】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0141】200mWで励起した際に利得11dBを得た。利得係数は0.07 dB/mWであった。

【0142】<実施例40>実施例40においては、コアにTmを3000ppm、Ndを3000ppm共添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0143】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0144】200mWで励起した際に利得4dBを得た。利得係数は0.03 dB/mWであった。

【0145】<実施例41>実施例41においては、コアにTmを3000ppm、Dyを3000ppm共添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0146】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0147】200mWで励起した際に利得7dBを得た。利得係数は0.05 dB/mWであった。

【0148】<実施例42>実施例42においては、コアにTmを3000ppm、Smを3000ppm共添加したアルミ系多成分ガラスファイバを用いた。

【0149】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバの構造パラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例13の場合と同じである。

【0150】200mWで励起した際に利得1dBを得た。利得係数は0.007 dB/mWであった。

【0151】<実施例43>実施例43においては、コアにTmを3000ppm、Tbを3000ppm共添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0152】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0153】200mWで励起した際に利得26dBを得た。利得係数は0.20 dB/mWであった。

【0154】<実施例44>実施例44においては、コアにTmを3000ppm、Euを3000ppm共添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0155】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0156】200mWで励起した際に利得18dBを得た。利得係数は0.14 dB/mWであった。

【0157】<実施例45>実施例45においては、コ

アにTmを3000ppm、Hoを3000ppm共添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0158】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0159】200mWで励起した際に利得22dBを得た。利得係数は0.17 dB/mWであった。

【0160】<実施例46>実施例46においては、コアにTmを3000ppm、Ndを3000ppm共添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0161】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0162】200mWで励起した際に利得6dBを得た。利得係数は0.01 dB/mWであった。

【0163】<実施例47>実施例47においては、コアにTmを3000ppm、Dyを3000ppm共添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0164】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0165】200mWで励起した際に利得1dBを得た。利得係数は0.007 dB/mWであった。

【0166】<実施例48>実施例48においては、コアにTmを3000ppm、Smを3000ppm共添加したTe系ガラスファイバを用いた。

【0167】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例19の場合と同じである。

【0168】200mWで励起した際に利得4dBを得た。利得係数は0.03 dB/mWであった。

【0169】<実施例49>実施例49においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなるフッ化物ガラス光ファイバを用いた。図15に示すように2層コア12の内側の層13にはTmが2000ppm、外側の層14にはTbが2000ppm添加してある。クラッドには何も添加されていない。このファイバにおいては、(i) TmとTbが分離されていることから、相互作用(クロスリラクセーション)による増幅効率の低下を防ぐことができる。(ii) コアを伝搬する光は、図15に示したような光の強度分布を持っている。コアの内側にTmが添加されていることから、導波する励起光の強度が高い部分を用いて高効率に励起することができる、という2つの利点を持つ。

【0170】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、光ファイバ増幅器の構成は実施例1の場合と同じである。内側コア径と外側コア径の比を図15に示すように1:3とした。

【0171】励起光源が0.8μm帯LD、1.2μm帯LD、1.58μm帯ファイバレーザとした場合の小

10

20

30

40

50

信号利得特性は次の通りである。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 5dB を得た。利得係数は 0.07dB/mW であった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得は 26dB であった。利得係数は 0.4dB/mW であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 28dB を得た。利得係数は 0.40dB/mW であった。

【0172】<実施例50>実施例50においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなるフッ化物ガラス光ファイバを用いた。そのコアの内側の層には Tm が 2000ppm 、外側の層には Eu が 2000ppm 添加してある。クラッドには何も添加されていない。

【0173】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例49の場合と同じである。

【0174】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例49と同じ傾向を示した。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 3dB を得た。利得係数は 0.045dB/mW であった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得は 20dB であった。利得係数は 0.3dB/mW であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 22dB を得た。利得係数は 0.32dB/mW であった。

【0175】<実施例51>実施例51においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなるフッ化物ガラス光ファイバを用いた。そのコアの内側の層には Tm が 2000ppm 、外側の層には Ho が 2000ppm 添加してある。クラッドには何も添加されていない。

【0176】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例49の場合と同じである。

【0177】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例49と同じ傾向を示した。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 5dB を得た。利得係数は 0.07dB/mW であった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得を得ることはできなかった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 23dB を得た。利得係数は 0.35dB/mW であった。

【0178】<実施例52>実施例52においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなるフッ化物ガラス光ファイバを用いた。そのコアの内側の層には Tm が 2000ppm 、外側の層には Nd が 2000ppm 添加している。クラッドには何も添加されていない。

【0179】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例49の場合と同じである。

【0180】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例49と同じ傾向を示した。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に利得は得られなかった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 2dB を得た。利得係数は 0.03dB/mW であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の信号に信号利得 3dB を得た。利得係数は 0.045dB/mW であった。

【0181】<実施例53>実施例53においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなるフッ化物ガラス光ファイバを用いた。そのコアの内側の層には Tm が 2000ppm 、外側の層には Dy が 2000ppm 添加してある。クラッドには何も添加されていない。

【0182】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例49の場合と同じである。

【0183】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例49と同じ傾向を示した。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW のときに利得は得られなかった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得は 8dB であった。利得係数は 0.12dB/mW であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得が 10dB を得た。利得係数は 0.15dB/mW であった。

【0184】<実施例54>実施例54においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなるフッ化物ガラス光ファイバを用いた。そのコアの内側の層には Tm が 2000ppm 、外側の層には Sm が 2000ppm 添加してある。クラッドには何も添加されていない。

【0185】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例49の場合と同じである。

【0186】励起光源が $0.8\mu\text{m}$ 帯のLD、 $1.2\mu\text{m}$ 帯LD、 $1.58\mu\text{m}$ 帯ファイバレーザとした場合の、この増幅器の小信号利得特性は実施例49と同じ傾向を示した。励起光源が $0.8\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に利得は得れなかった。励起光源が $1.2\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 4dB を得た。利得係数は 0.06dB/mW であった。励起光源が $1.58\mu\text{m}$ の場合の励起光強度が 100mW の場合に信号利得 6dB を得た。利得係数は 0.1dB/mW であった。

【0187】<実施例55>実施例55においては、同

心の2層からなる2層コアとクラッドからなり、コアの内側の層にはTmが2000ppm、外側の層にはTbが2000ppm添加してある石英ファイバを用いた。クラッドには何も添加されていない。

【0188】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバ増幅器の構成は実施例7の場合と同じである。ファイバの全コア径を4 μ mとし内側コア径：外側コア径を1：3とした。比屈折率差を1%、ファイバ長を80mとした。

【0189】励起光源を1.58 μ m帯ファイバレーザとした場合の小信号利得特性を示す。励起光強度が200mWの場合に信号利得35dBを得た。利得係数は0.25dB/mWであった。

【0190】<実施例56>実施例56においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなり、コアの内側の層にはTmが2000ppm、外側の層にはEuが2000ppm添加してある石英ファイバを用いた。クラッドにもEuが2000ppm添加してある。吸収剤としてのEuイオンは1.8 μ mで吸収率が小さいため、多くのイオンが添加しづらい石英ファイバにおいては、多大な効果を期待できないが、このような構造のファイバを採用しクラッドにも吸収剤Euを添加することにより、吸収の効果をより一層上げることが可能となる。

【0191】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例55の場合と同じである。

【0192】励起光強度が200mWの場合に信号利得23dBを得た。利得係数は0.15dB/mWであった。

【0193】<実施例57>実施例57においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなり、コアの内側の層にはTmが2000ppm、外側の層にはHoが2000ppm添加してある石英ファイバを用いた。クラッドにもHoが2000ppm添加してある。

【0194】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例55の場合と同じである。

【0195】励起光強度が200mWの場合に信号利得25dBを得た。利得係数は0.20dB/mWであった。

【0196】<実施例58>実施例58においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなり、コアの内側の層にはTmが2000ppm、外側の層にはNdが2000ppm添加してある石英ファイバを用いた。クラッドにもNdが2000ppm添加してある。

【0197】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例55の場合と同じである。

【0198】励起光強度が200mWの場合に信号利得

10dBを得た。利得係数は0.8dB/mWであった。

【0199】<実施例59>実施例59においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなり、コアの内側の層にはTmが2000ppm、外側の層にはDyが2000ppm添加してある石英ファイバを用いた。クラッドにもDyが2000ppm添加してある。

【0200】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例55の場合と同じである。

【0201】励起光強度が200mWの場合に信号利得9dBを得た。利得係数は0.075dB/mWであった。

【0202】<実施例60>実施例60においては、同心の2層からなる2層コアとクラッドからなり、コアの内側の層にはTmが2000ppm、外側の層にはSmが2000ppm添加してある石英ファイバを用いた。クラッドにもSmを2000ppm添加してある。

【0203】用いた光ファイバのガラス組成、光ファイバパラメータ、2層コアの構造、光ファイバ増幅器の構成は実施例55の場合と同じである。

【0204】励起光強度が200mWの場合に信号利得2dBを得た。利得係数は0.015dB/mWであった。

【0205】<実施例61>実施例61においては、コアにTmを2,000ppm、クラッドにTbを4,000ppm添加したフッ化物ファイバを用いた。

【0206】フッ化物ガラスファイバは、ガラス組成がZrF₄-BaF₂-LaF₃-YF₃-AlF₃-LiF-NaF系の単一モードファイバ(ZBLYNファイバ)を用いる。光ファイバの作製原料比、構造パラメータおよび光ファイバ増幅器の構成は本実施例で特に示した以外は実施例1と同様である。本実施例ではコア径を1.8 μ m、比屈折率差を3.7%とし、ファイバ長をそれぞれ5m、10m、13mとした3種類のファイバを用いる。

【0207】用いた増幅器の構成は実施例1と同様であった。励起光源は1.2 μ m帯の場合についてのみ検討を行った。

【0208】図16にはこれらのファイバから得られる増幅された自然放光(ASE)のスペクトルを示す。Tmファイバを用いた場合には本来1.75~2.0 μ m帯に大きなASEが得られるが、このファイバを用いた場合には図16に示すように、ピークを1.67 μ mとして1.6~1.75 μ m帯にわたるASEが得られた。このことは、Tbをクラッドに添加したためにその1.75~2.0 μ mのASEが抑圧され、その結果1.65 μ m帯の高効率増幅が可能となることを示している。

【0209】図17にはこれらファイバ長がそれぞれ5

m (□), 10m (△), 13m (○) のファイバを用いた光ファイバ増幅器の小信号利得特性を示す。ファイバ長13mの場合に小信号利得18.5dBを得た。すべてのファイバにおいて、励起光強度が大きくなるにつれ利得が増加するが、ある励起光強度を境に飽和傾向に転じる。ファイバ長が長いほど、利得を得るために必要な励起光強度(利得しきい値)や、利得が増加傾向から飽和傾向に転じる励起光強度は大きい、得られる利得は高くなる。このことから、高利得を得るためには励起光強度を大きくし、ファイバ長を長くする必要があることが分かる。

【0210】<実施例62>実施例62においては、コアにTmを2,000ppm、クラッドにTbを4,000ppm添加したフッ化物ファイバを用いた。フッ化物ガラスファイバは、ガラス組成が $ZrF_4-BaF_2-LaF_3-YF_3-AlF_3-LiF-NaF$ 系の単一モードファイバ(ZBLYALNファイバ)を用いる。光ファイバの作製原料比、構造パラメータはここに特に示した以外は実施例1と同様である。本実施例ではコア径を1.8 μm 、比屈折率差を3.7%とした。

【0211】図18に本実施例で用いた光ファイバ増幅器の構成を示す。20は入力信号光を示す。増幅用の上記フッ化物ファイバとしては長さ13mと10mの2本のZBLYALNファイバ21, 22を用いる。それぞれのファイバの入口には1.2 μm の励起用半導体レーザー23, 23、および励起光と信号光を合波するWDMファイバカップラ24, 24が取り付けられている。2つの増幅用ファイバの間には、お互いの増幅用ファイバの大きなASE光が相互に入らないように、光アイソレータ25と信号光帯域のバンドパスフィルタ26を挿入する。それぞれのフッ化物ファイバの両端には、モードフィールドの不整合による損失を低減するために、フッ化物ファイバと同じモードフィールドと比屈折率差を持つ高比屈折率差石英ファイバ27A, 27Bが接続されている。この接続においては、フッ化物ファイバと高比屈折率差石英ファイバの両端にV溝をつけ、それぞれをUV接着剤を用いて接着している。高比屈折率差石英ファイバ27A, 27Bと一般の石英ファイバ間は融着後、マイクロパーナーであるTEC処理(サーマル・エクスパンデッド・コア(thermal expanded core)処理)が施してある。

【0212】図19にはこの増幅器を用いて得られる小信号利得特性を示す。それぞれのファイバは同じ励起光強度で励起し、図19の横軸には励起光強度の合計をとっている。励起光140mWの場合に、小信号利得35dBを得た。利得効率は0.75dB/mWであった。

【0213】図20には励起光強度を120mWとした場合の、この増幅器の利得スペクトルを示す。この図から分かるように1.65 μm ~1.67 μm の間で利得25dB以上を達成した。

【0214】また、この増幅器における雑音指数は小信号増幅時に7~8.5dB、飽和出力は3dBmであった。

【0215】以上、本発明を実施例に基づいて具体的に説明したが、これらの吸収剤イオン添加の効果は前述のフッ化物ガラス、石英ガラス、アルミ系多成分ガラス、Te系ガラス以外にも様々な考えられるが、その主旨を逸脱しない範囲において変更は可能である。

【0216】また光ファイバ増幅器の構成に関しても、前述実施例に限定されるものではなく、要旨を逸脱しない範囲で変更は可能である。

【0217】

【発明の効果】以上説明したように、活性イオンTmを用いた1.65 μm 帯増幅用ファイバにTb, Eu, Ho, Nd, Sm, Dyのうち少なくとも1種類以上を、コアまたはクラッドに添加することにより、1.8~2.0 μm 帯の増幅された自然放光(ASE)の成長を抑制することができ、また1.8~2.0 μm 帯におけるレーザ発振を止めることができるため、高効率、高利得増幅が実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】Tmのエネルギー準位図である。

【図2】一般的な光ファイバ増幅器の構成図である。

【図3】活性イオンTmの $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ の遷移の吸収スペクトルと蛍光スペクトルを示すスペクトル図である。

【図4】Tbイオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。

【図5】Euイオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。

【図6】Hoイオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。

【図7】Ndイオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。

【図8】Dyイオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。

【図9】Smイオンの吸収スペクトルを示すスペクトル図である。

【図10】フッ化物ガラスファイバを用いた光ファイバ増幅器の構成図である。

【図11】クラッドにTbを添加したTm添加フッ化物ガラスファイバを用いた光ファイバ増幅器の小信号増幅特性を示す特性図である。

【図12】Tm単独添加フッ化物ガラスファイバ増幅器の小信号増幅特性を示す特性図である。

【図13】石英ファイバを用いた光ファイバ増幅器の構成図である。

【図14】クラッドにTbを添加したTm添加石英ファイバを用いた光ファイバ増幅器の小信号増幅特性を示す特性図である。

【図 15】 2 層コア構造の中の内側の層に T m、外側の層に T b を添加したファイバのコアの断面図である。

【図 16】 コアに T m、クラッドに T b を添加したフッ化物ガラスファイバ（実施例 6 1 のファイバ）から得られる増幅された自然放出光（ASE）のスペクトル図である。

【図 17】 実施例 6 1 の光ファイバ増幅器の小信号利得特性を示す特性図である。

【図 18】 コアに T m、クラッドに T b を添加したフッ化物ガラスファイバを用いた実施例 6 2 の光ファイバ増幅器の構成図である。

【図 19】 実施例 6 2 の光ファイバ増幅器の小信号利得特性を示す特性図である。

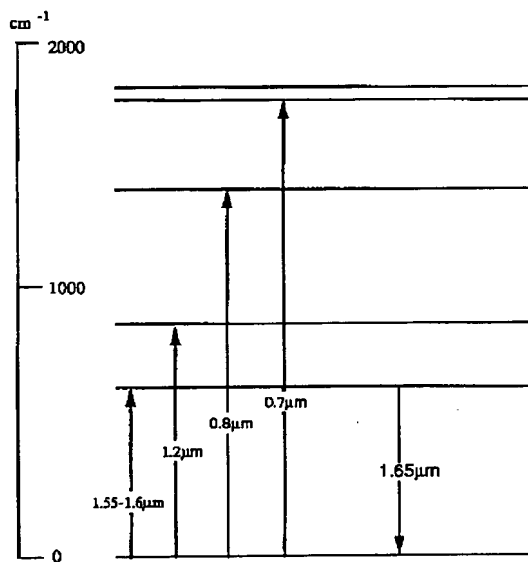
【図 20】 実施例 6 2 の光ファイバ増幅器の利得特性を示す特性図である。

【符号の説明】

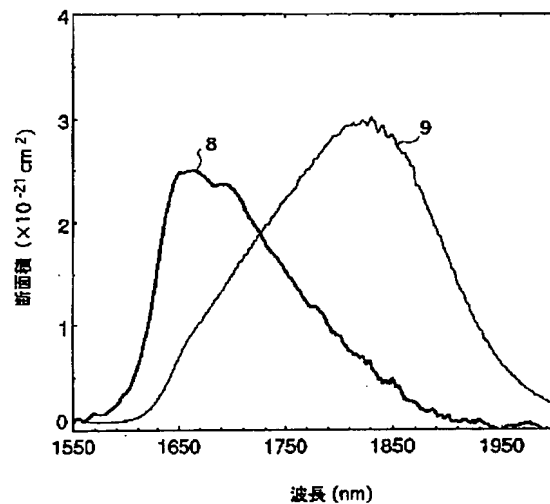
- 1 光ファイバ
- 2 信号入力用光ファイバ
- 2 A 信号光
- 3 励起光源

- 3 A 励起光
- 4 WDMファイバカップラ（合波器）
- 5 光アイソレータ
- 6 信号光出力用光ファイバ
- 7 A, 7 B 高 Δn 石英ファイバ
- 8 吸収断面積を表わす曲線
- 9 蛍光断面積を表わす曲線
- 10 （増幅用）光ファイバ
- 11 （増幅用）光ファイバ
- 12 2 層コア
- 13 2 層コアの内側の層
- 14 2 層コアの外側の層
- 20 入力信号光
- 21 ZBLYALNファイバ（13m）
- 22 ZBLYALNファイバ（10m）
- 23 1.2 μ m 励起用半導体レーザ
- 24 WDMファイバカップラ
- 25 光アイソレータ
- 26 信号光帯域のバンドパスフィルタ
- 27 A, 27 B 高比屈折率差石英ファイバ

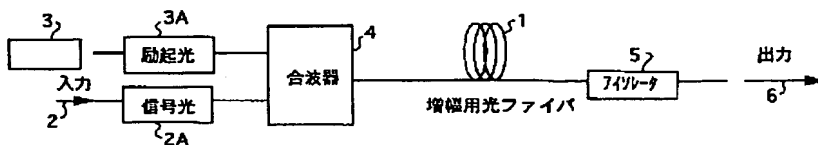
【図 1】



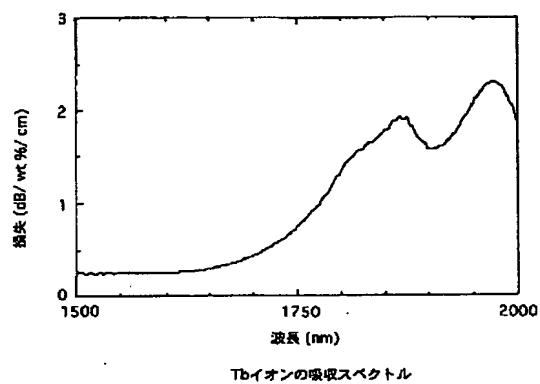
【図 3】



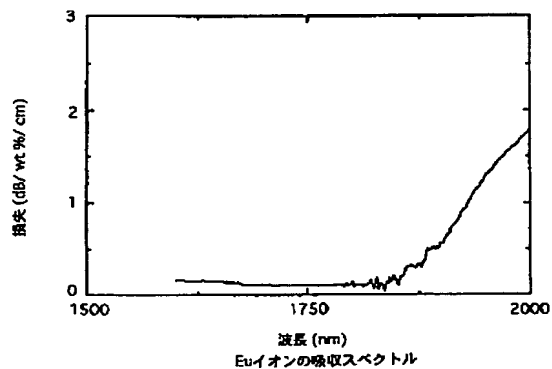
【図 2】



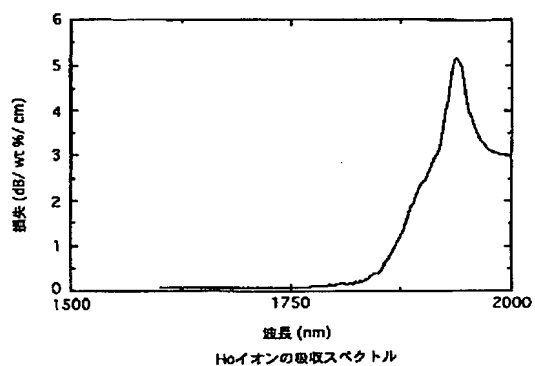
【図4】



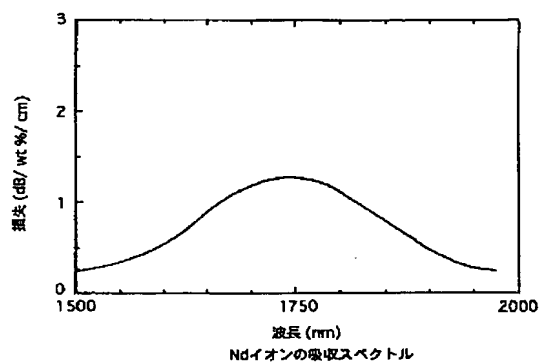
【図5】



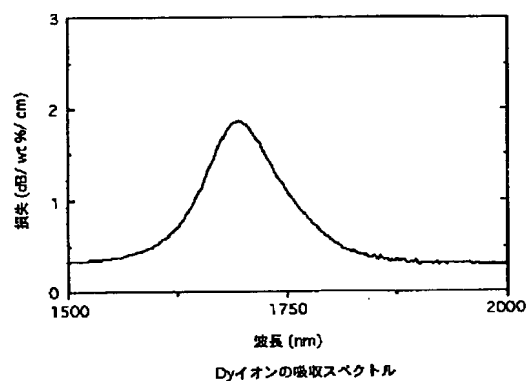
【図6】



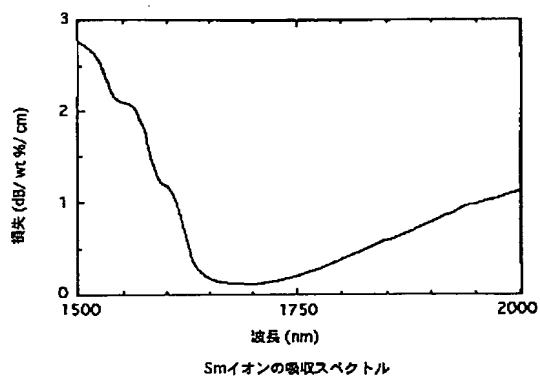
【図7】



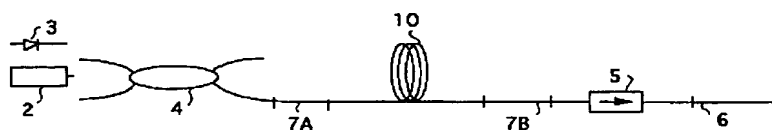
【図8】



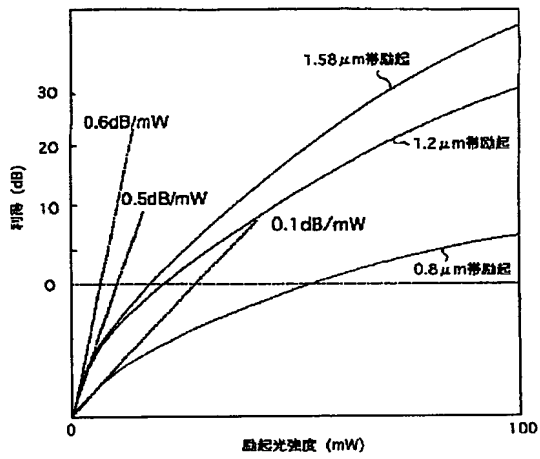
【図9】



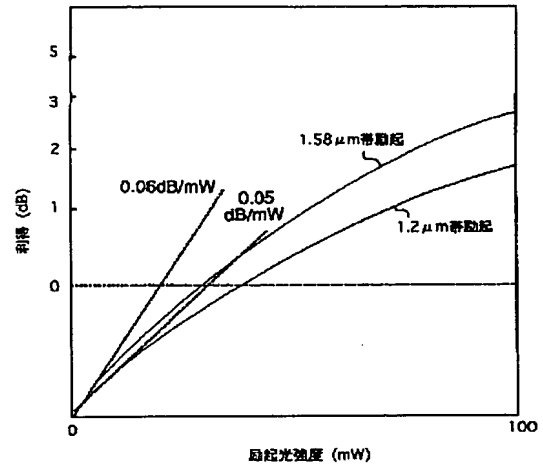
【図10】



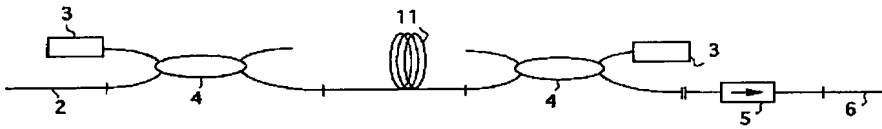
【図 11】



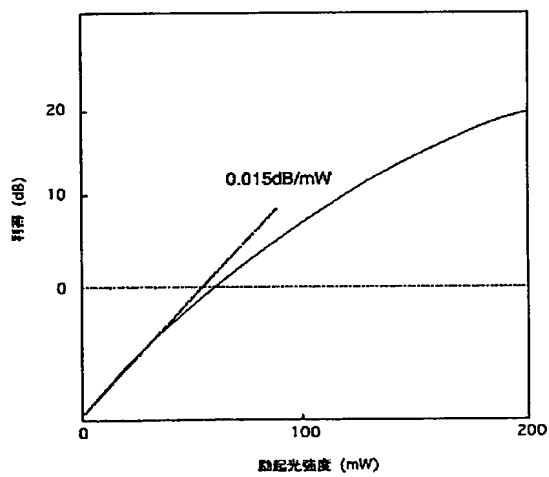
【図 12】



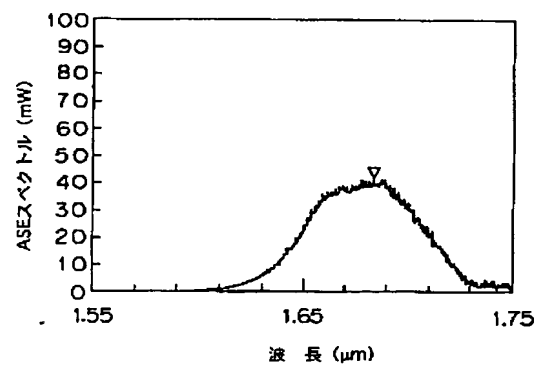
【図 13】



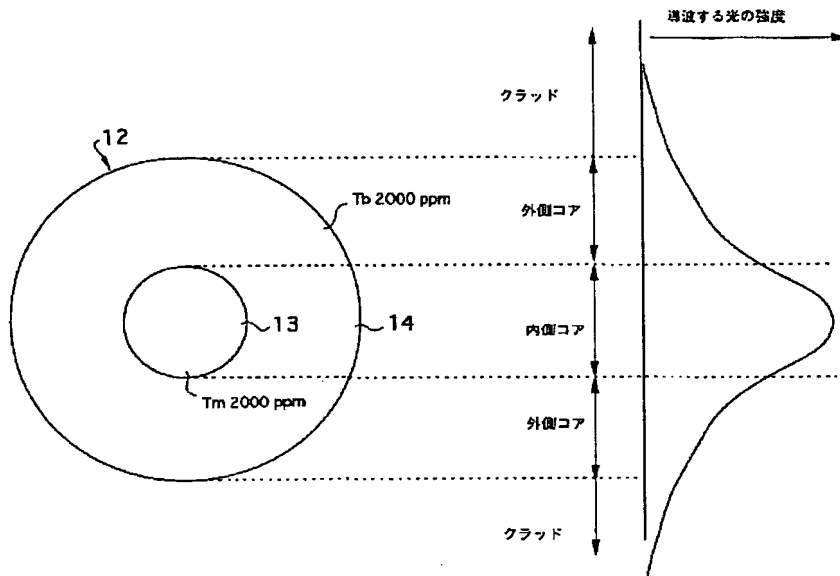
【図 14】



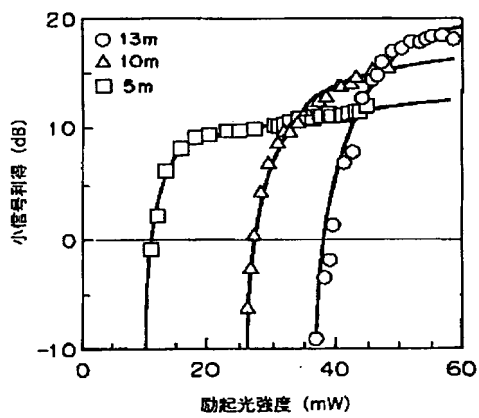
【図 16】



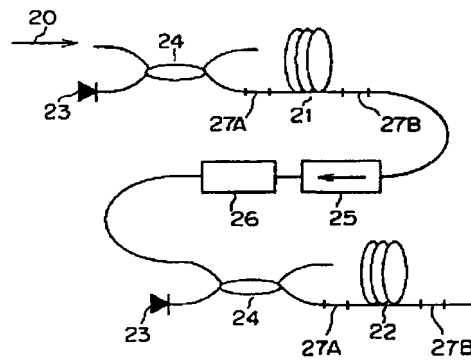
【図15】



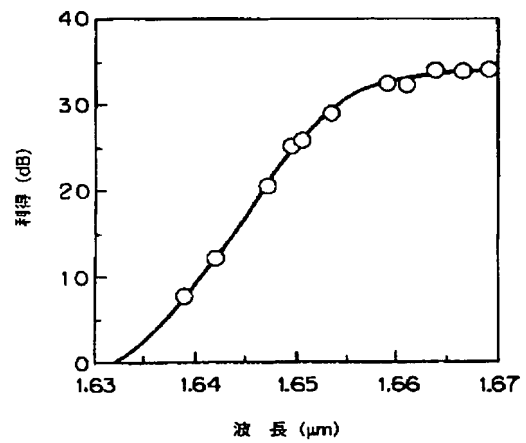
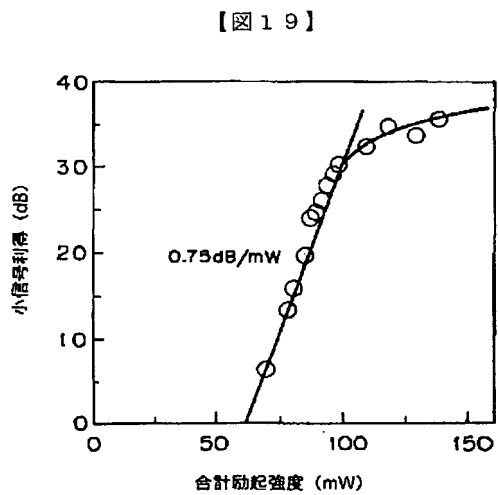
【図17】



【図18】



【図20】



フロントページの続き

(72) 発明者 清水 誠
東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 6 号 日
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 大石 泰丈
東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 6 号 日
本電信電話株式会社内
(72) 発明者 須藤 昭一
東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 6 号 日
本電信電話株式会社内